



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

Meluvaikutukset ja -mallinnukset tuulivoimahankkeissa

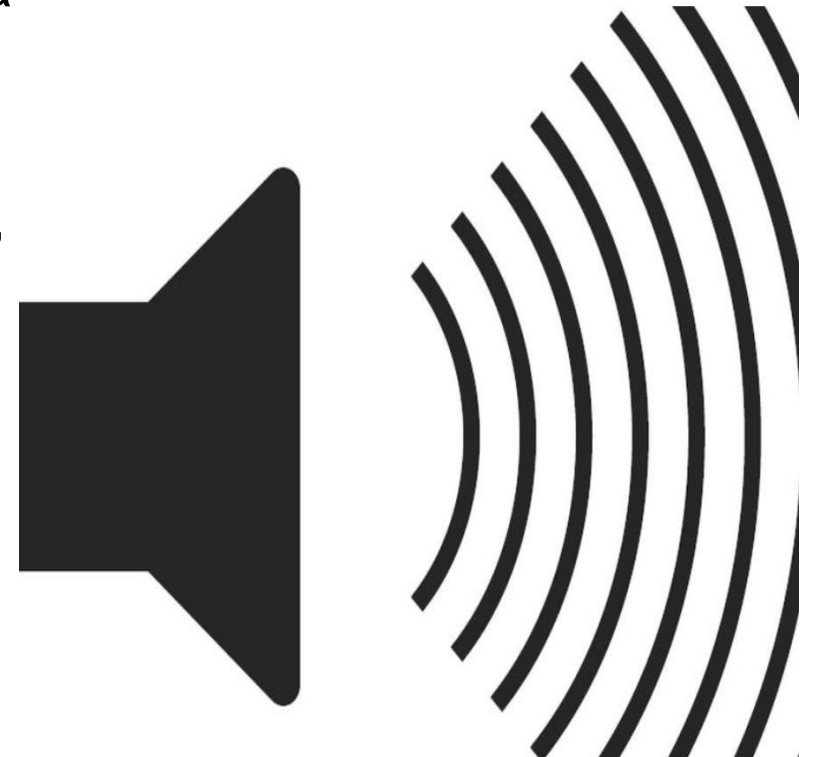
Tietoa tuulivoimasta kuntien päättäjille ja valmistelijoille

Larri Liikonen

7.5.2024

ÄÄNI

- ÄÄNI on aaltoliikettä, joka etenee väliaineessa.
- Äänen aiheuttamat paineen vaihtelut voidaan havaita kuuloaistimuksena, tuntoaistimuksena tai mittaamalla.
- Äänen kuvaamisessa käytetään voimakkuutta (taso), ajallista vaihtelua, taajuutta ja taajuusjakaumaa (spektri)
- 1 dB muutos havaittavissa korvalla (juuri ja juuri), käytännössä 2-3 dB
- 3 dB muutos merkityksellinen muutos äänitasoon (**äänienergian** kaksinkertaistuminen)
- 10 dB muutos **aistitaan** melun kaksinkertaistumisena

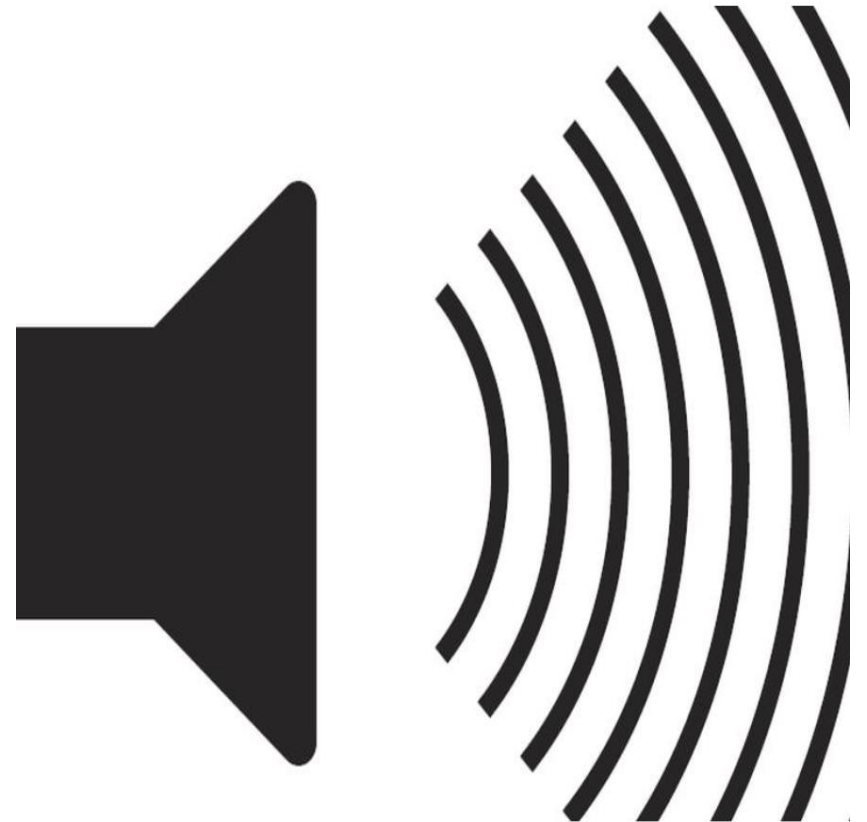


ÄÄNI

- Äänen voimakkuutta kuvataan taso käsitteellä
 - Tasojen yksikkö on desibeli (dB), jonka asteikko on logaritminen
 - 3 dB lisäys äänitasossa tarkoittaa melun (energian) kaksinkertaistumista
 - 10 dB lisäys tasossa = melu energian 10 kertaistumista
 - 20 dB 100 kertaistumista jne.

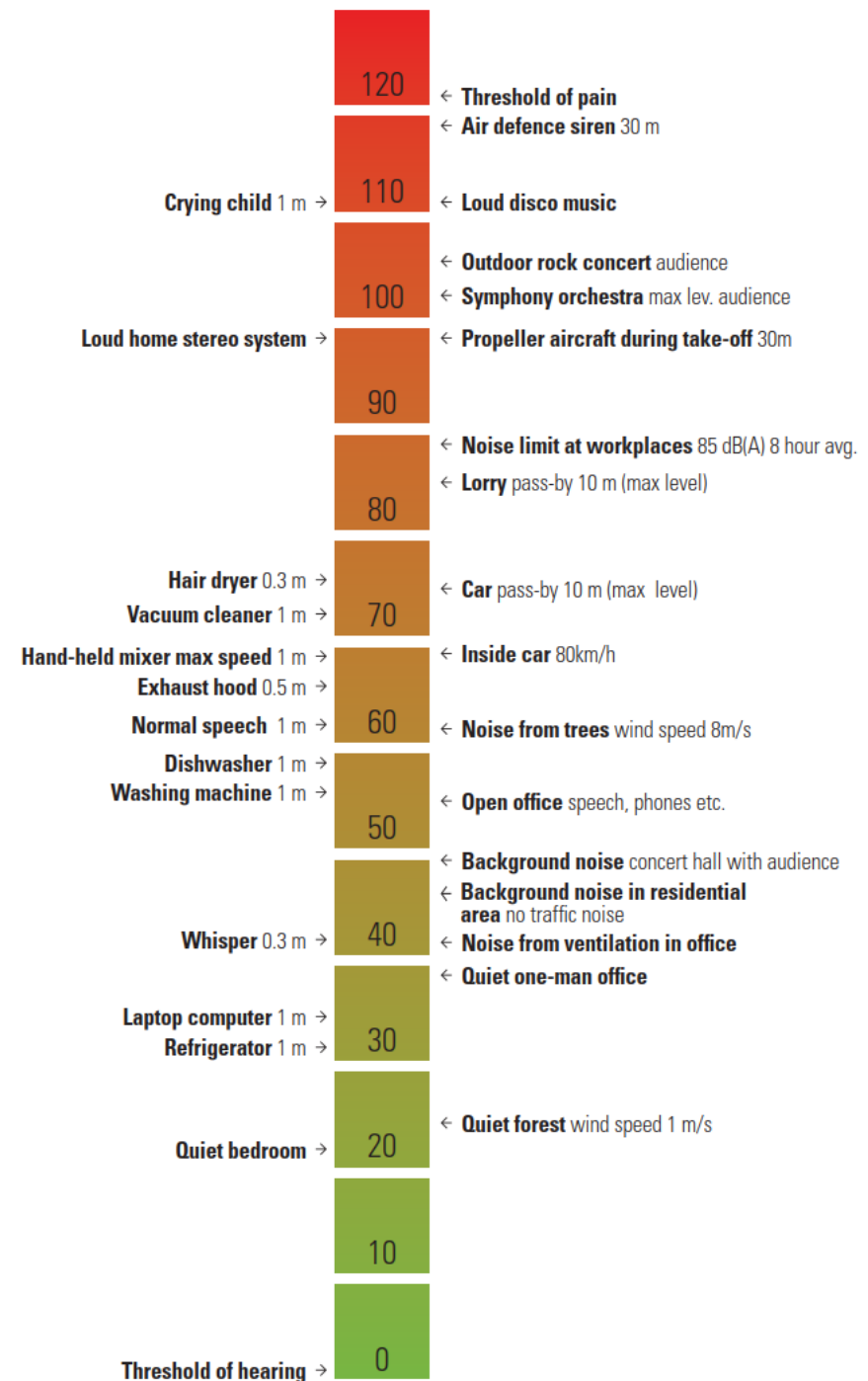
Suppeasti dB matematiikkaa

- $50 \text{ dB} + 50 \text{ dB} = 53 \text{ dB}$
- $60 \text{ dB} + 50 \text{ dB} \sim 60 \text{ dB}$ ns. 10 dB sääntö (huom. meluntorjunta)



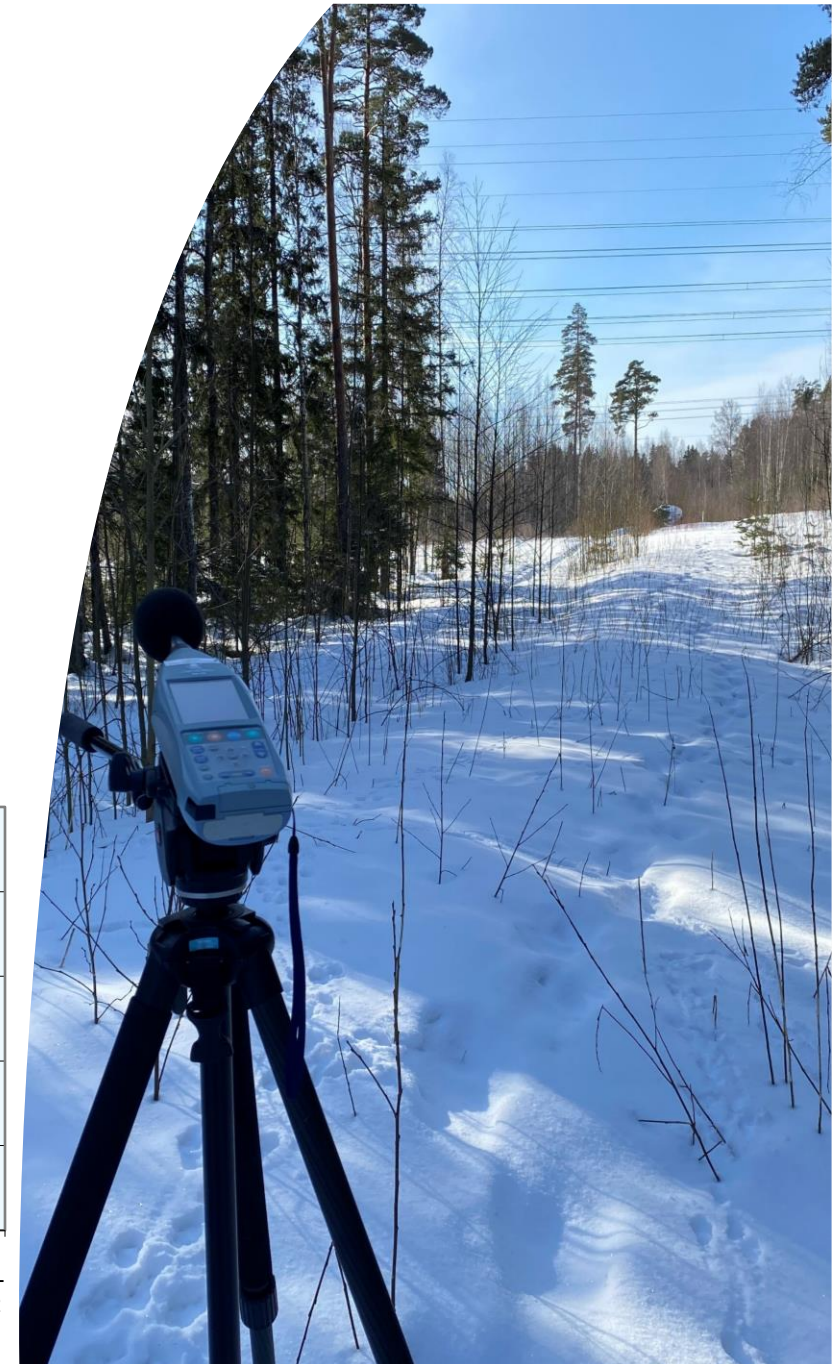
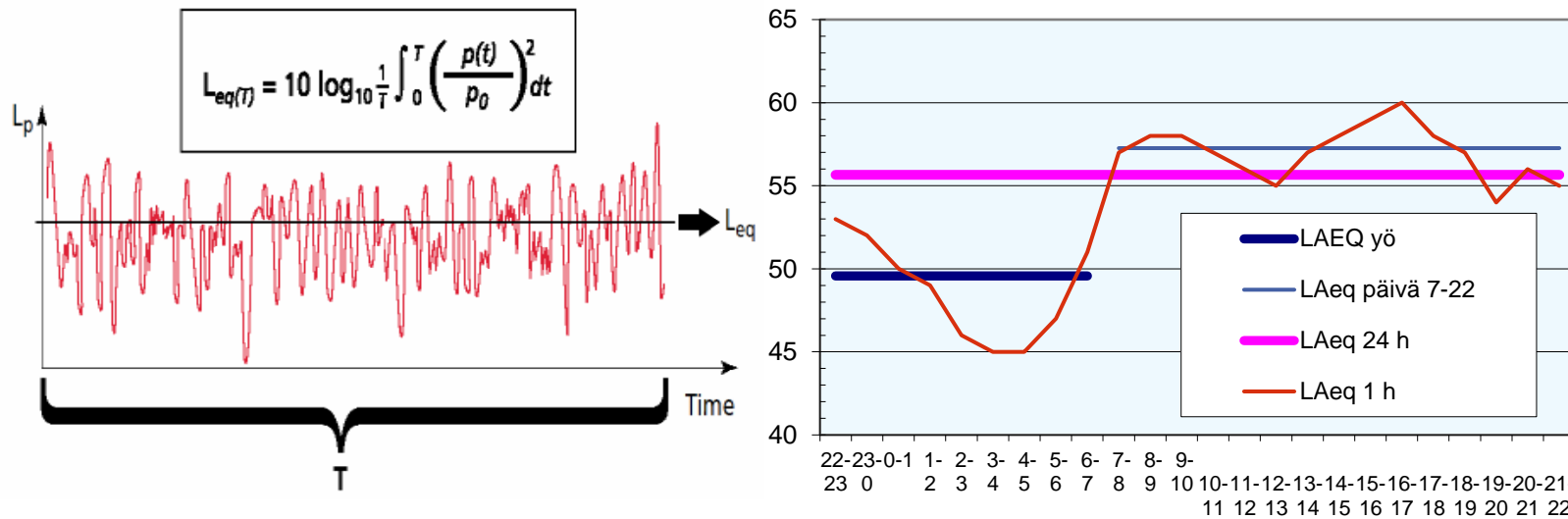
TYYPILLISIÄ ÄÄNENPAINETASOJA

- Kuulokynnys 0 dB
- Hiljainen makuuhuone 20 dB
- Kuiskaus 40 dB (0,3 m)
- Melun ohjearvo 55 dB
- Normaali puhe 60 dB (1 m)



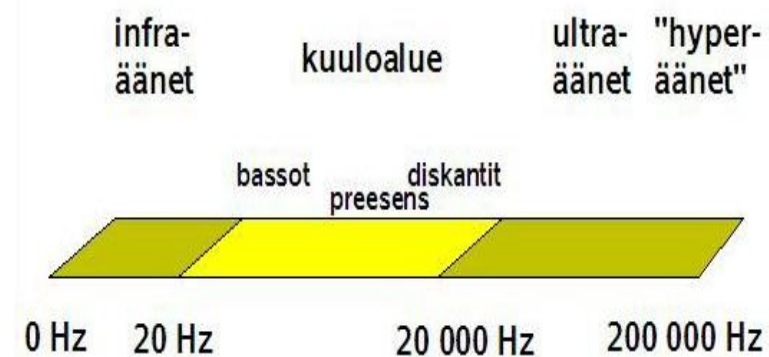
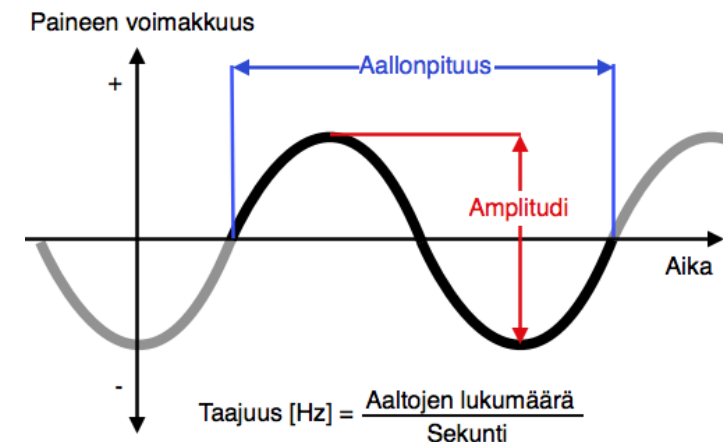
Keskiäänitaso $L_{Aeq, t}$

- Keskiäänitaso (ekvivalenttitaso, A-äänitaso)
- keskiäänitaso vastaa jatkuvaa vakioäänitasoa
- mittausjakson äänenpainetasojen **tehollinen** keskiarvo
 - Eli se korostaa suurimpia hetkellisiä äänitasoja



ÄÄNEN TAAJUUKSISTA

- Äänen taajuus = värähdystä sekunnissa Hz
- Ääniaallon pituus (m) = äänen nopeus (340 m/s) / taajuus (Hz)
- Korva aistii herkimmin äänen taajuudet 500- 6000 Hz
- **Pienitaajuinen ääni**
- Äänet joiden taajuus on 20–200 hertsiä (Hz) jolloin aallon pituus 17-1,7 m
- **Infraääni**
- Äänet joiden taajuus on alle 20 hertsiä (Hz), ovat pääsääntöisesti kuuloalueen alapuolella
- Luonnossa infraääniä tuottavat muun muassa tuuli ja maanjäristykset jne.
- Ilman absorptio ei vaikuta merkittävästi pieniin taajuuksiin < 1000 Hz ja ne leviävät pidemmälle kuin suuret taajuudet
- Pienet taajuudet läpäisevät myös rakenteet (julkisivun) paremmin kuin suuret taajuudet



MELU

- **MELU** on ääntä, joka koetaan epämiellyttävänä tai häiritsevänä tai joka on muulla tavoin terveydelle vahingollista tai hyvinvoinnille haitallista
 - Terveysvaikutukset (altistus, ajankohta, kesto)
 - Ympäristömelulle annettujen ohje-arvojen ylittävä äänitaso
 - Subjektivisuus (häiritsevyys, viihtyisyys, estää/häiritsee jonkin toiminnan)
- Luonnon äänet eivät ole melua (paitsi rakenteissa+yrittystoiminta)



MELUN HAITTAVAIKUTUKSIA

YMPÄRISTÖMELUN TERVEYS- JA HYVINVOINTIVAIKUTUKSET,
JOISTA TUTKIMUSNÄYTÖN VAHVUUS ON RIITTÄVÄ (EEA 2010)

- **Häiritsevyys**
- **Vaikutukset uneen**
- **Raportoitu/koettu terveys**
- **Stressi**
- Oppiminen ja muisti
- Kohonnut verenpaine
- Sepelvaltimotauti



TUULIVOIMA MELUN VAIKUTUKSET

- Tuulivoimaloiden ohjearvojen mukaisella melulla ei näyttäisi olevan terveysvaikutuksia (Hongisto et.al 2022)
- Tutkimusten perusteella myöskään tuulivoimaloiden infraäänellä ei ole vaikutusta ihmisten terveyteen, jos ohjearvot alittuvat
- Samassa tutkimuksessa havaittiin, että liikenteen melulla on selvä vaikutus ihmisten terveyteen.
- Tuulivoiman vaikutuksista alueiden viihtyisyyteen ei ole suomalaisia tutkimuksia.



TUULIVOIMA MELUN VAIKUTUKSET

- Elinympäristön laadun ja viihtyisyyden vähentyminen
 - Vaikutukset virkistäytymiseen
 - Vaikutus vapaa-ajan liikkumiseen
 - Lisää automatkoja
 - Alueiden arvostus
 - taloudellinen vaikutus (asuntojen/tonttien hinta)



MUITA VAIKUTUKSIA

(melu, välke, värähtely, elinympäristön muutos?)

VAIKUTUKSET ELÄIMIIN

- populaatiokoon pieneneminen, muutokset lintujen soidinkäyttäytymisessä, poikastuoton väheneminen ja poikaskuolleisuuden kasvu.
- Monet linnut ja nisäkäslajit väistävät tuulivoima-alueita
 - Väistämisessä eroja lajien sisällä ja lajien välillä
 - Siirtyminen 500 m - 5 km
- Luonnonvarakeskus (LUKE) selvitys 2023
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320723004834?via%3Dihub>
- LISÄÄ TUTKIMUSTA TARVITAAN



TUULIVOIMAN OHJEARVOT

Keskiäänitaso ulkona	Päivällä Klo 7-22	Yöllä Klo 22-7
pysyvä asutus	45 dB	40 dB
loma-asutus	45 dB	40 dB
hoitolaitokset	45 dB	40 dB
oppilaitokset	45 dB	-
virkestysalueet	45 dB	-
leirintäalueet	45 dB	40 dB
kansallispuistot	45 dB	40 dB

Sisämelu

Elinympäristöön vaikuttavaa toimintaa suunniteltaessa ja järjestettäessä sekä tällaista toimintaa harjoitettaessa huomioon otettavista sisämelutasoista säädetään terveysuojelulaissa (763/1994) ja sen nojalla annetuissa säännöksissä -- **545/2015**.



TUULIVOIMAN OHJEARVOT

SISÄTILOISSA

Yöaikaisen (klo 22-7) pienitaajuisen (20 Hz – 200 Hz) sisämelen toimenpiderajat nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa terssikaistoittain (huom! lineaariset eli painottamattomat tasot)

Kaista/Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Leq,1h/dB	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

Päiväajan (klo 7–22) pienitaajuiselle melulle sovelletaan 5 dB suurempia arvoja kuin taulukossa

Sisätilojen äänitason arvioinnissa käytettyjä ääneneristävyyden tasoja (DSO virallinen), varovaisuusperiaatteen perusteella (Anojanssi)

f/ Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
DL σ (DSO 1284)	6.6	8.4	10.8	11.4	13	16.6	19.7	21.2	20.2	21.2	21.2
DL σ (Anojanssi-projekti)	7.6	8.3	9.2	10.3	11.5	13	14.8	16.8	18.8	21.1	22.8



Tuulivoimaloiden melun arviointi

Tuulivoiman melupäästöön ja leviämiseen vaikuttavat tekijät

- VOIMALAN MELUPÄÄSTÖ
 - Tuulen nopeus
 - Lapojen ominaisuudet ja voimalan asetukset
 - Ilmamassan kerrostuneisuus (lämpötilaerot)
- LEVIÄMINEN
 - Sääolosuhteet lapojen korkeudella ja maanpinnalla
 - Tuulen nopeus eri korkeuksilla
 - Ilmamassan kerrostuneisuus (lämpötilaerot)
 - Maaston ominaisuudet mäet, vesistöt
- RAKENNUSTEN SISÄLLÄ KUULUVA MELU
 - Rakennuksen julkisivun ääneneristävyys
 - seinät, Ikkunat, ilmanottoaukot, (huoneakustiikka)



Tuulivoimaloiden melun arviointi

MELUSELVITYSTEN TARKKUUSTASO

- Esisuunnittelu
 - Mallinnus vapaasti valittavissa
- Ympäristövaikutusten arviointi (YVA), yksityiskohtainen kaavoitus ja rakennuslupaharkinta
 - ISO 9613-2/Ympäristöministeriön ohje 2/2014
- Ympäristölupamenettely
 - Nord2000



Tuulivoimaloiden melun arviointi

- Tuulivoimaloiden melu mallinnetaan Ympäristöministeriön ohjeen 2/2014 mukaisesti
 - ympäristölupamenettelyssä käytetään Nord2000 – laskentamallia keskiäänitasojen laskennassa
 - Pienitaajuisen melun osalta melun leviämisen mallinnus tehdään tanskalaisen standardin DSO 1284 mukaisesti 1/3-oktaaveittain taajuusvälillä 20-200 Hz
- Laskentaparametrit ovat vakioituja – lämpötila ja kosteus, maanpinnan absorptio ja heijastukset, sääolosuhde – neutraali, maanpinnan muoto huomioitava (ero 60 m)
- melumallinnuksen epävarmuus sisällytetään laskennan lähtöarvoina käytettyyn tuulivoimaloiden melupäästön lukuarvoon



Tuulivoimaloiden melun arviointi

- ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä ja yksitviskohtaisessa kaavoituksessa.

Suure ¹⁾	Parametrin lukuarvo ²⁾	Parametri määrittäjäperuste
Melupäästö tuulen nopeudella 8 m/s referenssi-korkeudella 10 m	Valmistajan ilmoittama(t): 1. Melupäästön (äänitehotason) takuuarvo 2. Melupäästön tonaalisuus tai kapeakaistaisuus 3. Melutaso 1/3-oktaaveittain taajuusalueella 20–200 Hz	1. IEC 61400–11 ³⁾ [8] ja IEC TS 61400–14 [3] 2. IEC 61400–11 [8] 3. DSO 1284 [7]
Äänen suuntaavuus	Oletuksena ympärisäteilevä suuntaamaton pistelähde tuulen suunnasta riippumatta	Äänen säteily vapaaseen avaruuteen, geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa
Ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus	Lämpötila: 15 °C Ilman suhteellinen kosteus: 70 %	ISO 9613-1 [5]
Maan- tai vedenpinnan absorption ja heijastuksen vaikutus	1. Vaikutuskerroin on 0, kun tuulivoimala on veden ympäröimänä (offshore voimala) 2. Vaikutuskerroin on maa-alueella 0,4 ja vesialueella 0, kun tuulivoimala sijaitsee maa- tai rannikkoalueella ⁴⁾	ISO 9613-2 [4] yleinen menetelmä (General method of calculation) kummassakin tapauksessa
Maanpinnan muodon vaikutus	Tuulivoimalan perustusten sijaitessa yli 60 metriä korkeammalla suhteessa melulle altistuvan kohteen maanpinnan korkeuteen voimalan melupäästön takuuarvoon lisätään 2 dB.	Mallinnus- ja mittaustulosten välinen ero.
Sääolosuhde	Neutraali–stabiili sääolosuhde, meteorologinen korjaus: 0	ISO 9613-2 [4]
Laskennan vaakaja pystyresoluutio	Vaakaresoluutio: 1,0 m Pystyresoluutio: 2,5 m	Tai tarkin käytettävissä oleva resoluutio
Pientaajuisten äänen etenemisvaimennus ⁵⁾	Geometrinen vaimennus 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa, maa- ja vesialuevaikutus DSO 1284 [7] mukaan.	DSO 1284 [7]

Tuulivoimaloiden melun mallintaminen

Modellering av buller från vindkraftverk

RAKENNETTU
YMPÄRISTÖ



Tuulivoimaloiden melun arviointi

- Meluselvitysten tulosten ja laadun kannalta tärkeää
 - Voimalan melupäästö = voimala toimittajan ilmoittama takuuarvo
 - Melupäästön takuuarvoon sisällytetään koko laskennan epävarmuus
 - Melupäästön taajuusjakauma, erityisesti pienitaajuinen melu 20-200 Hz, 1/3-oktaavikaistoittain
- Huomioitavia asioita melumallinuksissa:
 - Voimaloiden lukumäärä ja sijoittuminen
 - Laskentakorkeus 4 m (poikkeaa normaalista 2 m korkeudesta)
 - Korkeuserot (60 m)
 - Vesistö- ja ranta-alueiden huomiointi (ei joet/purot)
 - Ääneneristävyyden huomiointi
 - Äänen kapeakaistaisuus (iskumaisuus)
 - Merkityksellinen sykintä huomioidaan takuuarvossa

Tuulivoimaloiden melun mallintaminen

Modellering av buller från vindkraftverk

RAKENNETTU
YMPÄRISTÖ



Tuulivoimaloiden melun arviointi

- Keskiäänitason mallinnustuloksia verrataan VNp 1107/2015 mukaisiin tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoihin
- Sijoittamisessa mitoittava arvo on yöaikaisen toiminnan aiheuttama melu, jonka ohjearvo on 40 dB, päiväohjearvo on 5 dB korkeampi (pl. kansallispuistot).
- Yöajan ohjearvoja ei noudateta virkistysalueilla, eikä oppilaitosten alueilla.
- Pienitaajuisen melun laskentatuloksia verrataan STM:n asetuksen 545/2015 mukaisiin toimenpiderajoihin asunnossa sisällä
- Pääsääntöisesti sisämelun toimenpiderajat alittuvat silloin, kun ulkomelun keskiäänitaso alittaa sille asetetun VNp 1107/2015 ohjearvon.



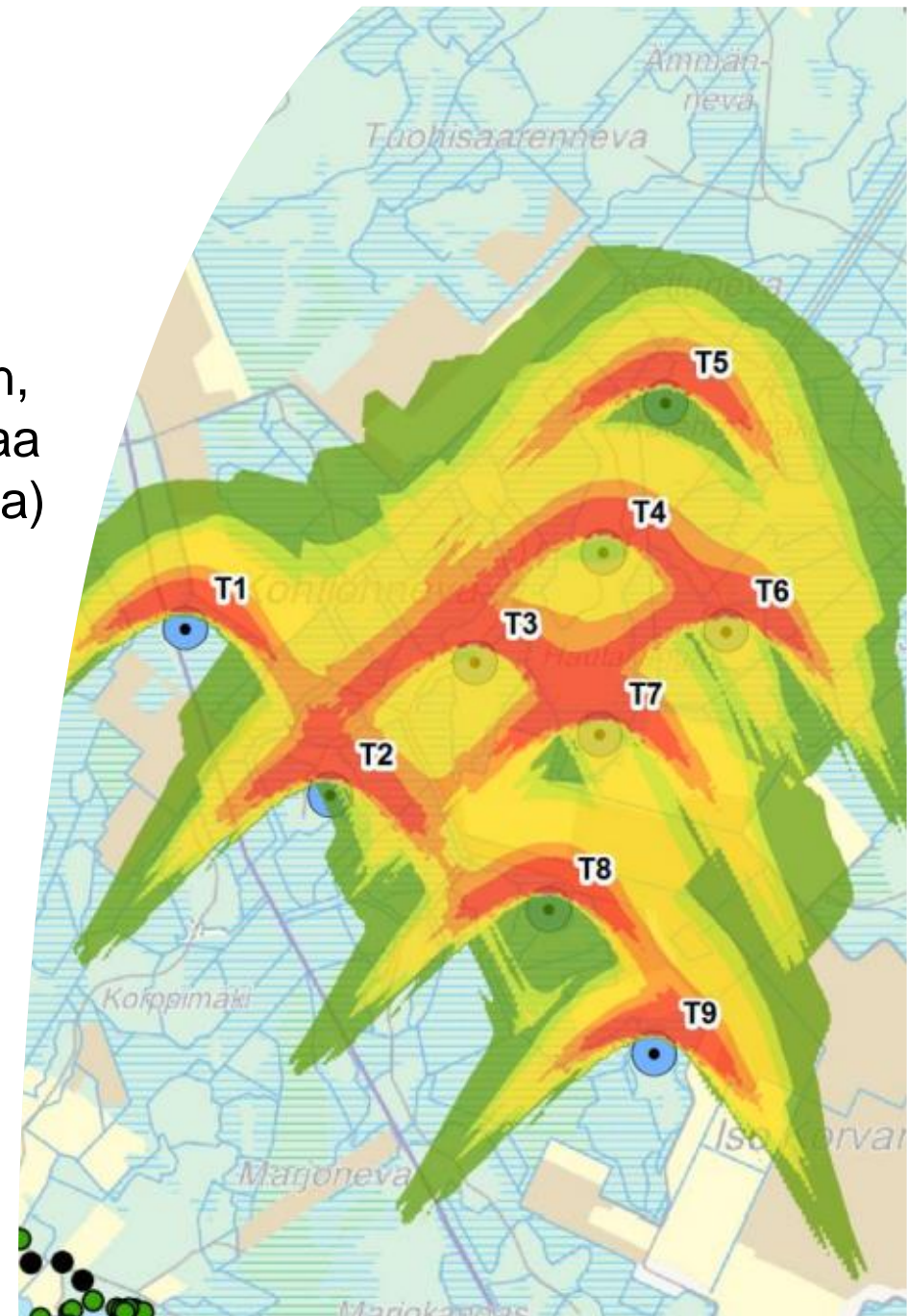
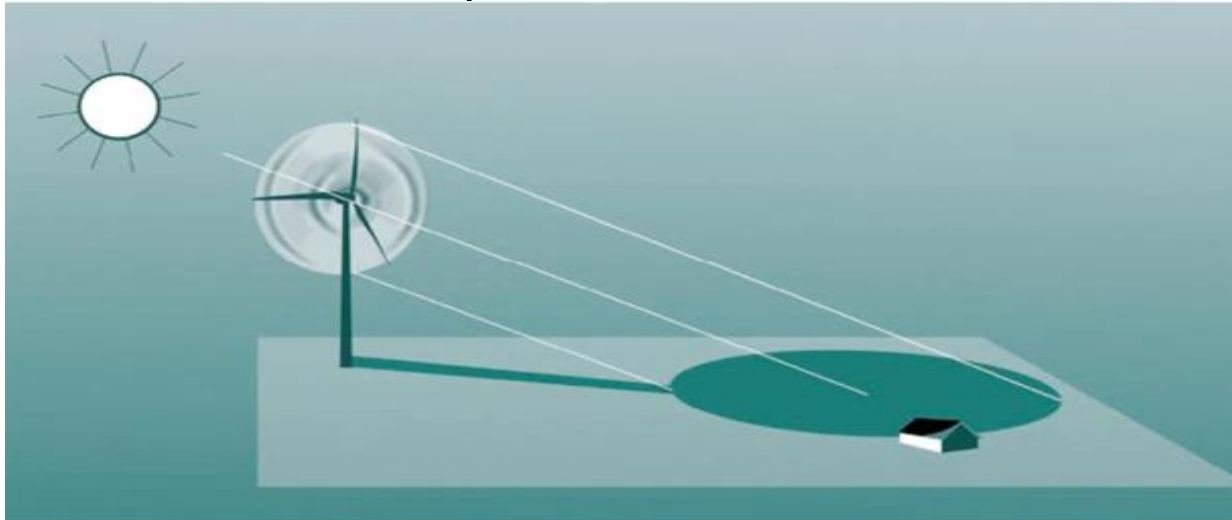
Tuulivoimaloiden melun arviointi

- Voimaloiden tehon kasvu ei ole nostanut voimaloiden melupäästöä LWA samassa tahdissa
 - Valmistajat tekevät kehitystyötä – laponen muotoilu/jättöpinta, laponen kulman säätö – taloudelliset vaikutukset?
- Melupäästön takuarvo saadaan valmistajalta tai se pitää mitata.
 - Ympäristöministeriön ohje 3/2014 mukaisesti, (IEC TS 61400-14)
 - Takuarvo sisältää mittaustuloksen + epävarmuuden
 - Tyypilliset melupäästön takuarvon lukuarvot tuulivoimaloille ovat välillä LWA 105-115 dB
- Melupäästön erilainen taajuusjakauma voi aiheuttaa hieman erilaisen melualueen samalla melupäästöarvolla LWA
- Napakorkeuden kasvu ei suoraa lisää melupäästöä, eikä kasvata meluvyöhykkeiden laajuutta
 - Maastonmuodot voivat vaikuttaa



Tuulivoimaloiden välke

- Tuulivoimala aiheuttaa liikkuvaa varjoa eli välkettä silloin, kun aurinko paistaa tuulivoimalan liikkuvien lapojen takaa katselupisteeseen (esimerkiksi asuinrakennuksen ikkuna)
- Välkettä ei synny kun on pilvistä, tuulivoimala ei ole käynnissä tai auringon asema on välkkeen muodostumiselle epäedullinen



MELU vs. VÄLKE

- Välkealueen laajuus voi olla suurempi, kuin meluvyöhykkeen laajuus
- Esimerkki erään tuulivoimapuiston ”real case” välkevyöhykkeistä ja 40 dB meluvyöhykkeestä
- Välkealuetta voidaan rajoittaa voimaloiden teknisellä ohjauksella – taloudelliset vaikutukset?

